

第1章

概论

太空环境是航天器运行的载体,太空中充斥着各种场、粒子和碎片,受太阳活动、地磁暴等影响,轨道上质子、电子、等离子体等扰动明显,可诱发航天器出现碰撞损伤、单粒子效应、充放电效应等,进而导致通信中断、轨道异常等故障,尤其在太阳风暴期间,地球辐射带内的电子、质子等可在极短时间内增加3~4个量级,时常诱发航天器功能异常,甚至报废。在太空资产日益增多,发射活动日趋频繁的态势下,太空环境感知已成为太空安全态势的重要组成部分,不同领域不同层级的运用也对太空环境感知提出了不同的需求,需在常规空间天气事件认知的基础上,聚焦人类太空活动和运用特点,明确太空环境感知对象、方法和信息运用,扩充太空态势感知的内涵和外延。

2012年2月1日,美国安全世界基金会在其网站上发布了太空态势感知(space situation awareness, SSA)的概念,概述了太空态势感知的方法、对象、力量分布等,认为太空态势感知就是对太空环境及其影响的表征。为适应全球战略的需要,美国在2020年提出了天域感知的概念,并强调未来太空是复杂环境的对抗,了解和利用太空必先认识太空环境。本书聚焦典型的太空活动类型,从太空环境的特点、影响和运用等角度,构建太空环境感知体系,并给出典型运用模式。

本章将对太空环境感知的基本概念、太空环境对人类活动的影响、发展历程和感知体系进行系统性阐述。

1.1 概念

太空存在各种类型的场、能量和物质,且处于不断发展和运动中。在太空环境感知领域,目前关注的主要对象为太阳爆发活动对航天器、雷达、望远镜等的影响。

同时,电离层加热、太空化学物质抛洒、高空核事件等人工手段也会影响太空环境要素的分布,而且这些人工环境要素往往与自然环境要素混杂,加剧了太空环境的复杂性,丰富了太空环境感知的维度和内容,也增加了太空环境扰动源识别的难度。

目前,空间科学、空间天气和航天工程等不同领域对自身的认知正处于不断发展中,不同领域对太空环境相关概念的定义各不相同,现有的各概念间既有区别又有联系。

1.1.1 太空与空间

在航天工程领域,“space”经常被翻译为“空间”或者“太空”。这两个词

在表达大气层以外的空域时词义重叠,可以互相取代。空间是一个名词,在中文中有多个不同的涵义。而“太空”则是专业名词,专为“大气层以外领域”使用。

“空间”一词具有多种含义:①“空间”是与“时间”相对的一种物质客观存在的形式,但两者密不可分,物与物的位置差异度量称为“空间”,位置的变化则由“时间”度量。空间由长度、宽度、高度、大小表现,通常是指四方上下(方向)。②当此词前有修饰语时,可用于说明和限定讨论的具体区域;当所指概念清楚时,可用“某某空间”,如外层空间、宇宙空间、室内空间等。③一般泛指易于使用的“空间”,如空间分布、空间密度、空间物理学等。④当特指大气层以外的空间时,一般用“太空”。

由于“空间”一词有多种含义,建议在描述地球大气层以外的时空时采用“太空”代替“空间”。但由于“空间”一词的使用时间已经很长,已经形成约定俗成的称谓,例如“空间法学会”“中国空间技术研究院”等,在使用时也可延用。

太空(space)区别于发生传统气象现象(风、云、雨、雪、霜、露、虹、晕、闪电、打雷等)的低层大气空间,是指稠密低层大气(通常在10km以下)之上的天域,是地球大气层以外天域的人工和自然环境的总和,又称“外层空间”。

太空和地球大气层并没有明确的边界,因为大气密度随着海拔增加而逐渐变薄。国际航空联合会定义100km的高度为卡门线,为现行大气层和太空的分界线。美国认定到达海拔80km卡门线的人为太空人,在太空船重返地球的过程中,120km是空气阻力开始发生作用的边界。通常,地球物理学家将大气(或称为“空气”)分为5层,其中海平面至10km为对流层,对流层有浓密的空气,称为“浓密大气层”;10~40km为平流层,40~80km为中间层,80~370km属于电离层的下部,370km以上的空间属于电离层的上部。为区别航空与航天,国际航空联盟(民间机构)申明以卡门线为分界线(约100km高度),以上部分为太空,为航天飞行;以下部分为大气层,为航空飞行。

在现代军事活动中,通常将大气层按照热力性质、电离性质或大气成分进行分类:按大气的热力学性质,一般划分为对流层、平流层、中间层、热层和外层;按大气的电离性质,可分为中性层、电离层和磁层;按大气成分的分布特点,又可分为均质层和非均匀层。在太空物理学研究领域,通常将太空划分为中高层大气、电离层、磁层、行星际、太阳大气等,由于地球大气约有75%在对流层内,97%在平流层以下,极其稀薄的气体一直延伸近千千米,且受太阳活动的影响而不断波动,通常将平流层及以下定义为临近空间

或太空大气的边界为宜。

“临近空间”是指传统民用航空高度(暂定 20km)以上、最低卫星维持轨道高度(200~300km)以下的空间,是航空与航天的过渡区域。美国将临近空间定义为 20~300km。当然,随着低轨或超低轨航天器技术水平的提高,太空与临近空间上边界的分界高度正在由常规的 300km 高度不断降低,考虑到 300km 以下的轨道自维持能力还为个例技术,本书认为将临近空间的上边界暂时定义在 300km 高度为宜。随着临近空间战略地位的不不断提升,其逐渐被划归太空范畴。

目前,对“太空”的下边界没有准确数值,学者多以 20km 为界,将 20~300km 定义为临近空间,200~1000km 为轨道大气层,60~1000km 为电离层,300~66 000km 为磁层,60 000km 以上为行星际或深空。

参照多方信息,本书所述的感知领域中的“太空”特指海平面 20km 以上的天域,在该天域内感知的主要对象为太空目标、太空环境及各类航天活动安全等,它们是构成未来天域感知的重要组成部分。

1.1.2 太空环境与空间天气

1. 太空环境

太空环境(space environment)的准确定义为“日地空间中能够对人类生活或技术系统造成影响的所有物质条件的总和”,包括自然环境(太空电磁环境、太空粒子环境等)、诱导环境和人工环境,其感知的内容为环境的分布状态、变化情况及其对人类活动的影响,也包含太空环境信息的主动应对和利用等内容。

根据太空人类活动应用和高度分布信息,本书将太空环境划分为太空大气环境、电离层环境、太空辐射环境、太空撞击环境、太空磁场环境和深空环境等。

1) 太空大气环境

太空大气(space atmosphere)特指距离地球海平面 20km 以上、近地轨道的大气环境。按照对人类活动的影响可分为临近空间大气和轨道大气,其与常规气象所指的平流层、中间层和热层等重合,对航天器、临近空间飞行器具有拖曳、原子氧剥蚀等效应。大气中的极光、气辉、红闪、蓝急流等发光现象会对侦察、预警等造成影响。大气是目前太空环境感知的重要对象。同时,随着人类活动天域的拓展,太阳大气、火星大气等正纳入太空大气的感知范畴:

临近空间大气,指飞行器在临近空间飞行中所处的大气环境,大气高度

通常为 20~300km,主要由 N_2 、 O_2 和惰性气体等组成,其对航天活动的影响主要为大气阻力和气动热。

轨道大气,指航天器在轨运行过程中周围的大气环境,高度通常为 300~1000km,主要由 O、N、 N_2 等组成,其对航天活动的影响主要为大气阻力,同时,氧原子对航天器表面材料的氧化和剥蚀效应也有较大影响。

2) 电离层环境

电离层环境指在地球上空 60~1000km 高度(扰动期可达 1500km,甚至更高),地球中性大气受太阳 X 射线、远紫外(far ultraviolet, FUV)、高能粒子和宇宙射线等的作用,大气中的分子或原子发生电离而形成的含有大量离子的区域。电离层环境是日地空间环境的重要组成,它对各种无线电信号的传播方向、速度、相位、振幅等均可产生明显影响,并由此导致无线电信号延迟、折射、吸收等各种效应。因此,它是很多无线电信息系统误差产生的主要源项之一,诸如卫星导航、卫星通信、短波通信、雷达监视和测控系统测量误差等。

3) 太空辐射环境

太空辐射环境指对航天器或航天员的安全和健康产生严重威胁的辐射,通常由粒子辐射、紫外辐射、激光、微波等组成,主要分为电离辐射环境和电磁辐射环境。电离辐射环境指能对物质进行电离作用的高能辐射,通常指太空的电子、质子、中子、X 射线等。电磁辐射环境指能对航天器电子学线路、航天员、侦察相机等的安全产生影响的低能辐射,主要指射电、激光、微波等。

4) 太空撞击环境

太空撞击环境指能对航天器、地球等产生冲击破坏的环境,通常指空间碎片、微流星体和尘暴等,它们分布在 300~36 000km 的 LEO、MEO、GEO 等轨道或者分布在具有尘与尘暴的星体表面,包括人工环境和自然环境。其中,人工环境主要指空间碎片,自然环境主要指微流星体、尘与尘暴等。对空间碎片而言,业务系统中通常把直径 1cm 以下的碎片划归为太空环境感知范畴,厘米级以上的碎片划归为太空目标感知范畴。

5) 太空磁场环境

从场源位置来说,地球磁场可分为内源场和外源场两部分。内源场起源于地表以下的磁性物质或电流,也叫“基本磁场”,它有一个缓慢的长期变化。外源场起源于地表以上的空间电流体系,这些电流体系变化复杂而迅速,外源场通常又称为“变化磁场”。地球磁场在地表与一个位于地心的磁偶极子的磁场相似,从磁北极(地理南极)发出,到了磁南极(地理北极)又回

到地球上。地球表面的磁场最强,随着高度增加,地球磁场逐渐减弱。地球磁场在高空,地球外部空间电流产生的磁场与内部磁场相互作用使其偏离偶极子场。就全球平均磁场来看,内源场占地球总磁场的 99%,外源场仅占 1%。外源场虽然比内源场弱得多,但这 1%的外源场起源于外部空间,携带近地太空环境的丰富信息,它的时空变化能够反映太阳、磁层、电离层和高层大气等一连串扰动变化信息,对研究地球太空环境极为重要。

6) 深空环境

深空环境指近地空间之外的天域,主要由粒子辐射环境、等离子体环境、小天体环境、行星及其卫星的环境要素或对象组成。深空环境对深空探测任务影响显著,包括高能带电粒子对航天器的辐射损伤、日球层等离子体对航天器测控通信的影响、行星环境对航天器和航天员安全的影响、小天体碰撞对航天器的物理损伤等。

2. 气象环境

从气象学角度,气象环境(meteorology environment)指以空气为载体的各种物理环境因素的组合,如由温度等引起的风、雨、雷、电、霜等。主要感知对象为温度和各种形式的降水。与气象领域相关的环境主要为“中高层大气”。在气象领域,根据大气温度随高度的变化特性,地球大气可划分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层。其中,接近地面、对流运动最显著的大气区域为对流层,对流层的上界为对流层顶,在赤道地区的高度约 17~18km,在极地约 8km;从对流层顶至约 50km 的大气层为平流层,平流层内的大气多做水平运动,对流十分微弱,臭氧层即位于这一区域内;中间层又称为“中层”,是从平流层顶至约 80km 的大气区域;热层是中间层顶至 300~500km 的大气层;热层顶以上的大气层为散逸层。

1) 对流层

对流层是大气的最下层。它的高度因纬度和季节而异。就纬度而言,低纬度平均为 17~18km;中纬度平均为 10~12km;高纬度仅 8~9km。就季节而言,对流层上界的高度夏季大于冬季,例如,南京夏季的对流层厚度可达 17km,冬季只有 11km。对流层集中了整个大气质量的 75%和几乎全部的水汽,具有以下 3 个基本特征:①气温随高度的增加而递减。平均每升高 100m 气温降低 0.65℃,其原因是太阳辐射首先加热地面,再由地面把热量传给大气,所以,越接近地面的空气受热越多,气温越高,远离地面则气温逐渐降低。②空气有强烈的对流运动。地面性质不同,受热不均。暖的地方空气受热膨胀而上升,冷的地方空气遇冷收缩而下降,从而产生空气

对流运动。对流运动使高层和低层空气得以交换,促进热量和水分传输,对成云致雨有重要作用。③天气复杂多变。伴随强烈的大气对流运动,水相发生变化,并可形成云、雨、雪等复杂的天气现象。因此,对流层与地表自然界和人类关系最为密切。

2) 平流层

平流层是对流层顶至约 50km 高度的大气。平流层的主要特征:①温度随高度增加由等温分布变为逆温分布。平流层的下层气温随高度的增加变化很小。大约在 20km 以上,气温又随高度的增加而显著升高,出现逆温层。这是因为在 20~25km 高度处,臭氧含量最多。臭氧能吸收大量紫外线,从而使气温升高,并大致在 50km 的高空形成一个暖区。平流层顶的气温可升至 270~290K。②垂直气流显著减弱。平流层中的空气以水平运动为主,空气垂直混合明显减弱,整个平流层比较平稳。③水汽、尘埃含量极少。因此,对流层中的天气现象在这一层很少见,只在底部偶然出现一些分散的贝云。平流层天气晴朗,大气透明度好。本层气流运动相当平稳,并以水平运动为主,平流层即由此得名。现代民用航空飞机可在平流层内飞行。

3) 中间层

中间层是从平流层顶到 85km 高度的大气。中间层的主要特征:①气温随高度增加而迅速降低,中间层的顶界气温降至 $-83\sim-113^{\circ}\text{C}$ 。因为该层臭氧含量极少,不能大量吸收太阳紫外线,而氮、氧能吸收的短波辐射又大部分被上层大气吸收,故气温随高度增加而递减。②出现强烈的对流运动,所以中间层又称为“高空对流层”或“上对流层”。这是由于该层大气上部冷、下部暖,致使空气产生对流运动。但由于该层空气稀薄,空气的对流运动不能与对流层相比。

4) 热层

热层是中间层顶到 800km 高度的大气。这一层的大气密度很小,在 700km 厚的气层中,只占大气总质量的 0.5%。热层的特征:①气温随高度的增加迅速升高。据探测,在 300km 高度上,气温可达 1000°C 以上。这是由于所有波长小于 $0.175\mu\text{m}$ 的太阳紫外辐射都被该层的大气物质所吸收。②空气处于高度电离状态。这一层的空气密度很小,在 270km 高度处的空气密度约为地面空气密度的百亿分之一。由于空气密度小,在太阳紫外线和宇宙射线的作用下,氧分子和部分氮分子被分解,并处于高度电离状态,故热层又称“电离层”。电离层具有反射无线电波的能力,对无线电通信有重要意义。

5) 散逸层

散逸层为热层顶以上的大气,它是大气的最外一层,也是大气层和星际空间的过渡层,但无明显的边界线。这一层空气极其稀薄,大气粒子或分子的碰撞机会很小。气温也随高度增加而升高。由于气温很高,空气粒子的运动速度很快,又因距地球表面远,受地球引力作用小,故一些高速运动的空气质点不断散逸到星际空间,散逸层由此而得名。在地球大气层外的空间,还围绕着由电离气体组成极稀薄的大气层,称为“地冕”,它一直伸展到22 000km高度。因此,大气层与星际空间是逐渐过渡的,并没有截然的界限。

3. 空间天气

“空间天气”(space weather)的概念是20世纪80年代以来提出并发展起来的,包含了地球中高层大气、太阳大气和行星际空间在内的日地空间环境条件,如太阳表面、日地空间、地球磁场、高层大气等,能够影响天基地基技术系统性与可靠性,危及人类健康与生命变化的物质。空间天气主要指由太阳活动引起的短时间尺度的环境变化,目前感知的主要对象为太阳爆发活动及由其诱发的空间天气事件,感知内容主要包括太阳X射线耀斑、高能电子暴、太阳质子事件、地磁暴等。

1.1.3 太空环境感知与空间天气预报

态势感知(situation awareness)的概念源于航天飞行的人因(human factors)研究,因为在动态复杂的环境中,决策者需要借助态势感知工具显示当前环境的连续变化状况才能准确地做出决策,态势感知已成为一项热门研究课题。目前,对态势感知的理解仍然存在诸多争议,但为大家广泛接受的是由Endsley提出的态势感知定义,即在一定的时空条件下,对环境因素的获取、理解、展示和对未来状态的预测。

太空态势感知是对一定时间内太空中航天器部署、装备配置、能力、行动和环境等各种信息的综合分析 with 实时掌控,其本质是通过集成情报、监视与侦察信息,明确太空中的状态与形势而开展的技术活动。主要包括太空目标监视和太空环境感知等方向,各方向可分为态势信息获取、态势理解和态势预测三个阶段。

太空环境感知(space environment awareness)隶属太空态势感知范畴,指对20km以上天域的各类太空环境要素、物态分布、扰动和影响等的监测评估、预报预警等。感知内容主要包括自然环境中的粒子、场和电磁辐射等环境要素的探测、监测、警报和预报,识别太阳风暴、航天装备运行环境

状态、电离层状态、空间光学和电磁背景等；也包含监测高空核事件、定向粒子束、太空电磁环境等人工环境，迅即识别环境风险，区分自然环境和人工环境扰动，给出告警预警和应对措施。

空间天气预报(space weather forecast)与常规天气预报中感知平流层以下的风霜雨雪等状态变化类似，空间天气感知的高度主要是 20km 以上的区域，预报对人类太空活动有影响的天气事件的大小、持续时间和影响等信息。

1.1.4 实体域、信息域、认识域

太空环境感知的实体域主要包括太空环境感知的各种传感器、卫星平台与配套设施，以及相应的软硬件、信息交互网络及存储系统等组成，是开展太空环境研究的物理基础，主要包括：

- 地基设施；
- 海基设施；
- 空基设施；
- 临近空间设施；
- 天基设施(近地空间和日地空间)；
- 太空环境监测系统(含数据中心)。

太空环境感知的信息域是指太空环境信息的产生、处理和分享等，主要涉及各种太空环境感知信息、太空环境融合处理信息、太空环境认知分析信息、太空环境专项信息等，以及融合算法与分析工具，是构成太空环境信息系统的核心。主要包括：

- 太空环境感知信息种类，如太阳活动、日地磁活动、粒子、等离子体、环境效应等；
- 信息处理方法，如数据处理算法、融合分析模型等；
- 认知分析信息，如预报预警、自感知与威胁分析等。

太空环境感知的认识域是指研究人员对太空环境的观察、理解和感知，以及做出的决策，包括各种专家知识、专题信息、认知推理知识、信息先验认知等，是发展与提升智能化太空环境感知的重要组成。主要包括：

- 太空环境感知信息历史数据库；
- 专家知识库、推理方法；
- 深度学习与云计算方法；
- 其他智能感知与处理方法。

1.1.5 太阳爆发活动

太阳爆发活动指太阳大气中发生的持续时间短、规模巨大的能量释放现象,太阳活动是诱发近地环境扰动的主要源项,当太阳活动强烈(爆发)时,其对外输出电磁辐射、高能粒子和等离子体云,如果到近地空间,会引发日地空间一系列的强烈扰动,从而造成地球空间人员/系统和地空信息系统等出现不同程度的损害,太阳风暴发生后,通常以三种方式向行星际空间喷射能量和物质,这是空间天气关注的重点。

从时间维度看,爆发性太阳活动对近地空间的影响可主要归纳为三部分。

1) 超强的电磁辐射

电磁辐射主要包括 X 射线、紫外线、射电辐射等,它们在太空中以光速传播,大约 8.3min 后到达地球,主要攻击目标是向日面电离层和大气环境,会产生电离层突然骚扰、大气密度增加等现象,其攻击能持续几十分钟甚至两小时以上。

2) 太阳高能粒子

太阳高能粒子以远远超过声速的速度传播,几十分钟后到达地球,主要攻击目标包括磁层环境、空间飞行器和高纬电离层环境等,能持续几小时到几十小时。

3) 日冕物质抛射

日冕物质抛射携带的大量物质和磁场以每秒几百至几千千米的速度传播,能攻击大范围的地球磁层和电离层环境,持续几十小时至几天。其诱发的电离层变化主要包括背景电离层变化和扰动电离层变化,其实质是使电离层中不同尺度的电子密度发生变化,通过散射、折射等方式对穿越其中的电波信号产生影响。强太阳风暴直接引起的电离层异常变化主要表现为 3 个方面:电离层突然骚扰(sudden ionospheric disturbance, SID)、极盖吸收(polar cap absorption, PCA)和电离层暴(ionospheric storm),其诱发的地磁暴等能对太空大气分布状态产生较强扰动。

1.2 太空环境对人类活动的影响

太空已成为人类活动的重要场所,从 1957 年人类发射卫星以来,已有 5000 多颗卫星在轨飞行(不包括“星链”等巨型星座),人类的航天发射数据每年以 100 多次、500 多颗的速度增长,每年约将 100t 物质送入太空。随着